



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Mecánica

Laboratorio N°2
Ensayo de Charpy y Dureza

ME42A Metalurgia General
Profesor: Alejandro Zuñiga Paez

Ernesto Holzmann Illanes

Semestre Primavera 2006

Capítulo 1

Antecedentes Teóricos

1.1. Ensayo de impacto

El modo de fallo del ensayo de tracción no nos permite extrapolar los resultados a otras situaciones diferentes para predecir el comportamiento a la fractura, por ejemplo en algunos materiales normalmente dúctiles se fracturaban frágilmente sin tener apenas deformación plástica. El tipo de fallo está condicionado por las condiciones de contorno del material.

Para ensayar los materiales en las peores condiciones posibles con respecto a la fractura se crearon los ensayos de impacto. Estas condiciones son:

1. Deformación a temperaturas relativamente bajas.
2. Velocidad de deformación elevada.
3. Estado traxial de tensiones (mediante la presencia entalla mecánica)

Existen dos ensayos de impacto, estos son el ensayo **Charpy** y el de **Izod**. Estos dos ensayos han sido normalizados y diseñados para determinar la energía de impacto o tenacidad a la entalla, que se define como la energía absorbida por la superficie entallada cuando se rompe. En ambos ensayos se romperá una superficie entallada de un golpe dado con una masa-péndulo, la diferencia radica en la posición de la probeta entallada, como se muestra en la figura 1.1. La velocidad que adquiere la masa al golpear la probeta queda determinada por la altura del péndulo. Tras la rotura, la masa continúa su camino hasta llegar a una cierta altura, a partir de la cual se determina la energía absorbida. Así se medirá la energía absorbida por ese golpe.

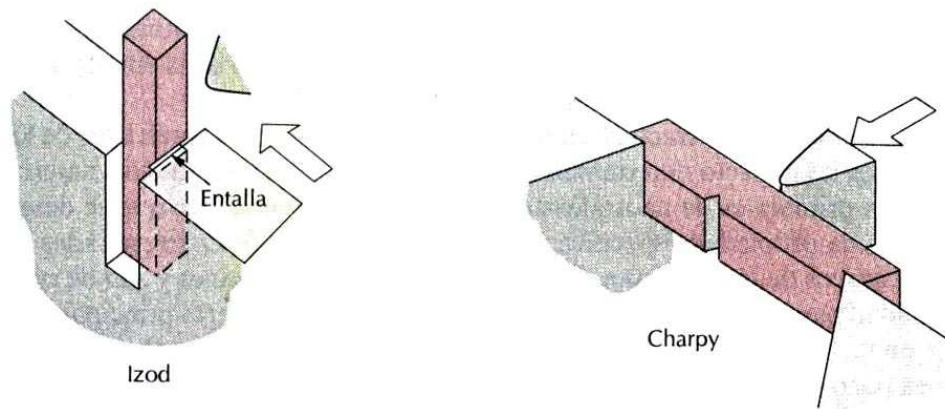
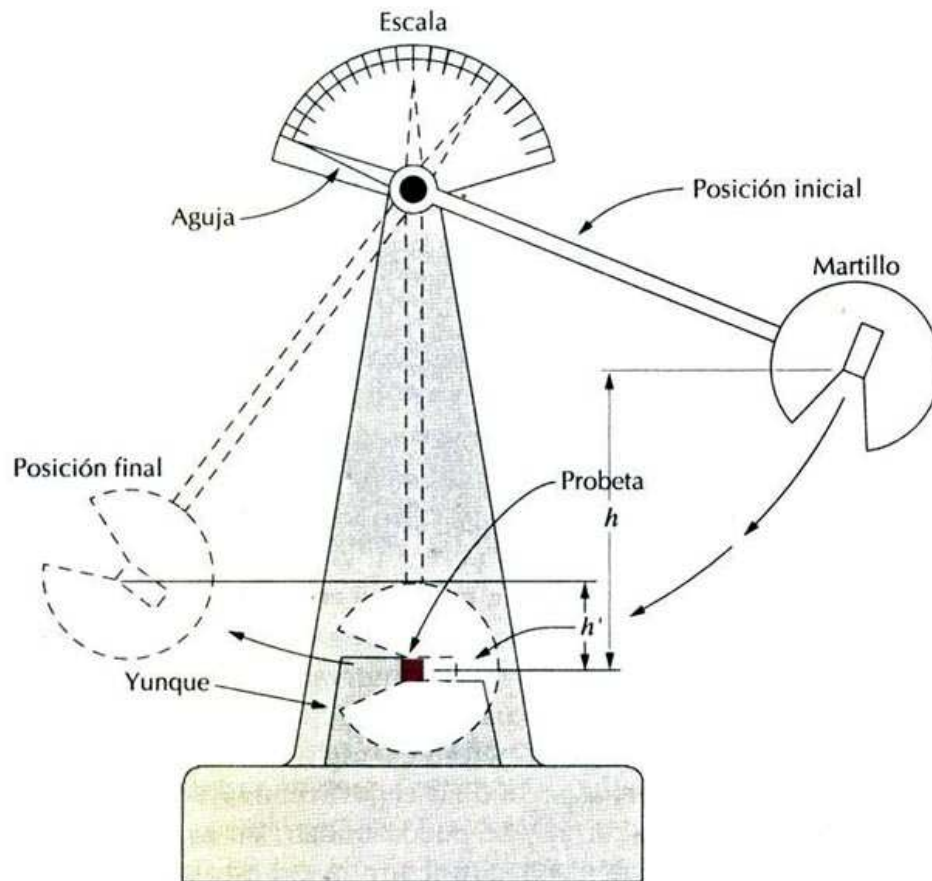


Figura 1.1: Montaje de la probeta en los ensayos Charpy e Izod.



La energía absorbida por la probeta (en [J]), se puede medir calculando la diferencia de energía del péndulo antes y después del impacto, mediante la altura a la que llega el péndulo después de romper la probeta (ecuación 1.1). El problema de este método es que

resulta muy inexacto medir la altura a la que llega la masa, entonces como se sabe el ángulo inicial del péndulo (α) y la máquina registra el ángulo final (β), mediante relaciones trigonométricas se llega a relacionar la energía absorbida en función de los ángulos y el largo del brazo en la ecuación 1.2.

$$E_{abs} = m \cdot g \cdot (h - h') \quad (1.1)$$

$$E_{abs} = m \cdot g \cdot (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (1.2)$$

Algo importante de estos ensayos es que se puede determinar la temperatura de transición frágil-dúctil (su principal ventaja sobre otros ensayos). Esto se consigue realizando el ensayo en iguales condiciones normalizadas, pero a distintas temperaturas. Lo que se hace es calentar o enfriar la probeta antes de realizar el ensayo (la distribución de temperaturas debe ser homogénea en toda la probeta). Se obtienen una serie de curvas características de cada material como las que se muestran en la figura 1.3.

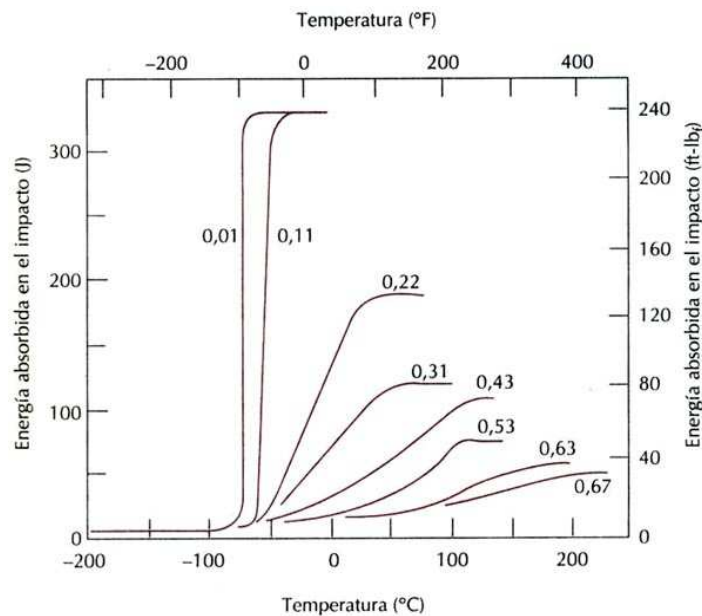


Figura 1.3: Curvas de transición frágil-dúctil para aceros en función de su porcentaje en peso de C.

Se observa que existe una dependencia de la energía absorbida con la temperatura. A altas temperaturas se absorbe gran cantidad de energía, lo que está relacionado con la

fractura dúctil. A bajas temperaturas tenemos una menor absorción de energía, lo que está relacionado con la fractura frágil.

Hay una influencia importante de la estructura del material en el tipo de fractura. En la mayoría de los casos habrá una transición brusca del comportamiento del material a alta temperatura y a baja temperatura. Existe lo que se denomina intervalo de transición dúctil-frágil (típico en materiales de estructura BCC).

Cuando no hay transición pronunciada, referimos la temperatura de transición dúctil-frágil a la temperatura para la cual el material absorbe 27 [J] de energía, o también a la temperatura para la cual el 50% de la superficie de fractura del material es de fractura dúctil.

1.2. Influencias microestructurales

1.2.1. Composición del material

En los aceros al introducir carbono formamos una solución sólida intersticial (porque los átomos de C son muy pequeños y ocupan los intersticios), el cual es un mecanismo de endurecimiento. Esto hace al material menos tenaz. Cuanto más carbono añadimos hacemos más favorable la fractura frágil. El oxígeno fragiliza también el acero, y de forma más pronunciada. Algo similar sucede con los elementos aleantes, abundantes en los aceros SAE 4140 y 4340.

1.2.2. Tamaño de grano

La disminución del tamaño de grano endurece al material y a la vez aumenta su tenacidad. Esto se debe a que la deformación inducida es más fácil de absorber debido a la gran superficie del límite de grano (de alto desorden). Es decir que al someter una probeta a un tratamiento térmico de recocido, el cual aumenta el tamaño de grano, el material se hace más dúctil pero menos tenaz a la fractura.

1.2.3. Estructura cristalina

Los materiales con estructura FCC son muy tenaces. Presentan una transición muy suave. Se utilizan para trabajar a temperaturas criogénicas (como por ejemplo los aceros

inoxidables austeníticos). Los materiales BCC presentan sin embargo una transición muy brusca. Los materiales HC tienen un comportamiento similar al de las aleaciones de alta resistencia (poca transición pero baja tenacidad), a excepción del titanio (muy tenaz).

Los materiales FCC serán dúctiles y tenaces para cualquier velocidad de aplicación de la carga y para cualquier temperatura.

Materiales dúctiles como los BCC a temperatura ambiente y bajas velocidades de aplicación de la carga se comportan como frágiles cuando la temperatura es baja y cuando a temperatura ambiente se aplica la carga a altas velocidades.

Esto significa que la fractura frágil se puede dar con uno o más requisitos. Los materiales HC serán frágiles en prácticamente todas las condiciones (con excepciones).

1.3. Ensayo de Dureza

La dureza se define como la resistencia del material a resistir una deformación plástica localizada, generalmente por penetración.

La primera forma de medir la dureza fue a través del rayado, donde se mide la resistencia que opone un material a dejarse rayar por otro. El ensayo de dureza Mohs es el que usa para determinar la dureza que se basa en que un cuerpo es rayado por otro más duro. Se tiene tabulado del 1 al 10 como sigue en la tabla 1.1, donde los aceros están entre el 6 y 8.

Tabla 1.1. Tabulación de la dureza Mohs

1.- Talco	2.- Yeso
3.- Calcita	4.- Fluorita
5.- Apatita	6.- Feldespato
7.- Cuarzo	8.- Topacio
9.- Corindón	9.- Diamante

Actualmente se usa otro tipo de medición de dureza basada en la resistencia que opone un material a dejarse penetrar por otro más duro. El ensayo de dureza es simple, de alto rendimiento ya que no destruye la muestra y particularmente útil para evaluar propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material. Los métodos

existentes para la medición de la dureza se distinguen básicamente por la forma de la herramienta empleada o penetrador, por las condiciones de aplicación de la carga y por la propia forma de calcular o definir la dureza. La elección del método para determinar la dureza depende de factores tales como las dimensiones de la muestra y espesor de esta.

1.3.1. Durómetro

Un durómetro es el instrumento de medición utilizado para realizar un ensayo de dureza y por ende poder medir la dureza de la muestra. Existen durometros especializados y calibrados para las distintas escalas y tipos de dureza, de las cuales hablaremos a continuación.

1.3.2. Escalas de Dureza

El método usado generalmente para obtener una medición de la dureza es medir la profundidad o el área de una marca dejada por una punta o penetrador de una forma específica, con una fuerza determinada puesta un momento específico. Hay tres métodos estándares para realizar esta prueba que expresan la relación entre la dureza y el tamaño de la marca, éstos que son Brinell, Vickers, y Rockwell. Por razones prácticas y de calibración de los durómetros, cada uno de estos métodos tiene una escala propia, definida por una combinación de la carga y de la geometría aplicada del penetrador.

1.3.2.1. Dureza Brinell (HBS)

Este ensayo de dureza Brinell consiste en comprimir una bola dura, de acero templado, de un diámetro determinado, sobre el material a ensayar, por medio de una carga fija y durante un tiempo conocido. Con la penetración de la bola en la muestra se puede medir la superficie de la marca semiesférica, entonces la dureza HBS es el cociente entre la carga efectuada y la superficie de la marca.

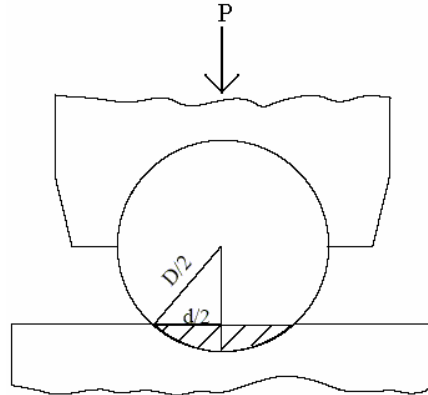


Figura 1.4: Esquema del ensayo de dureza Brinell

Entonces dejando todo en función de los datos queda la siguiente expresión:

$$HBS = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Donde P es la carga aplicada, D el diámetro de la bola del ensayo y d el diámetro de la marca.

El tiempo del ensayo va desde los 10 a los 15 segundos. Generalmente se usan bolas de 10 mm de diámetro. El valor de la carga P viene dado por la relación $P = KD^2$, donde K=cte. del ensayo. Los valores de K para algunos materiales son:

- Aceros y elementos siderúrgicos K=30
- Cobres, Bronces, Latones K=10
- Aluminio y aleaciones K=5
- Materiales blandos (Sn, Pb) K=2,5

Para realizar el ensayo se debe tener las siguientes consideraciones:

1. La superficie de la probeta debe ser plana, estar limpia, homogénea y perpendicular a la bola, libre de óxido y lubricantes.
2. El espesor de la probeta, debe ser al menos ocho veces la profundidad de la marca.
3. La distancia entre 2 huellas debe ser al menos de 4 a 6 d y la distancia del centro de la huella al borde de la muestra debe ser al menos 2,5 d.
4. Temperatura de ensayo es alrededor de 23° C

En las pruebas de metales extremadamente duros la bola del acero endurecido se reemplaza por una bola de carburo de tungsteno ya que para durezas superiores a 500 (aceros templados), ya que las bolas de acero se desformarían.

En la nomenclatura Brinell se muestra de la siguiente forma 152 HBS 10/3000/15, donde significa que son 152 cifras Brinell usando una punta de 10 mm de diámetro, con una carga de 3000 kgp por 15 seg. Como comúnmente se usan puntas de 10 mm de diámetro y durante 15 seg. se aplica la carga, solo se especifica el tamaño de la carga.

La medición de esta dureza se puede usar para diversos propósitos como:

- Determinar el %C de un acero. Solo valido para aceros al carbono.

$$\%C = \frac{HBS - 80}{141}$$

- Cálculo de la resistencia a la tracción.

$$\sigma_r = 0,36 HBS \approx \frac{HBS}{3}$$

1.3.2.2. Dureza Rockwell (HRX)

El ensayo de dureza Rockwell consiste en presionar el material de prueba con un cono de diamante o una punta esférica de acero templado. La punta es forzada en el material de prueba bajo una carga menor, generalmente de 10 kgf (10 kilogramos fuerza) como se muestra en la parte A de la figura 1.5. Después de esto, se debe esperar que se alcance el equilibrio, con un dispositivo que indica si continúa movimiedose la punta. En seguida se agrega la carga principal sumandola a la carga anterior (Fig. 1.5B). Cuando se alcanza el equilibrio otra vez, se quita la carga principal pero la carga preliminar se mantiene (Fig. 1.5C). El retiro de la carga principal permite una recuperación parcial, reduciendo así la profundidad de la penetración.

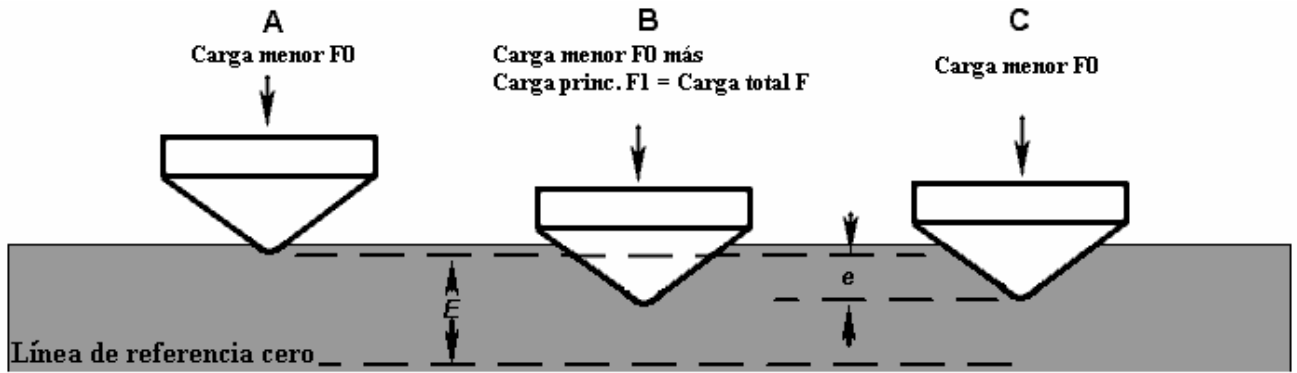


Figura 1.5: Esquema del ensayo de dureza Rockell

El aumento en la profundidad de la penetración, resultando del uso y del retiro de la carga principal se utiliza para calcular el número de la dureza de Rockwell que se calcula de la siguiente forma:

$$HRX = E - e$$

Generalmente este valor de dureza es medido por el durómetro, ya sea de forma digital o análoga.

Se utilizan diferentes escalas de medición de dureza Rockwell dependiendo de la punta que se utilice. También depende de esta las cargas utilizadas. Esto se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 1.2. Tipos de dureza Rockwell y cargas aplicadas según tipo de punta.

Escala	Tipo de Punta	Carga menor F_0 [kgf]	Carga mayor F_1 [kgf]	Carga Total F [kgf]	Valor de E [mm]
HRA	Cono del diamante	10	50	60	100
HRB	bola de acero de 1/16"	10	90	100	130
HRC	Cono del diamante	10	140	150	100
HRD	Cono del diamante	10	90	100	100
HRE	bola de acero de 1/8"	10	90	100	130
HRF	bola de acero de 1/16"	10	50	60	130
HRG	bola de acero de 1/16"	10	140	150	130
HRH	bola de acero de 1/8"	10	50	60	130
HRK	bola de acero de 1/8"	10	140	150	130
HRL	bola de acero de 1/4"	10	50	60	130
HRM	bola de acero de 1/4"	10	90	100	130
HRP	bola de acero de 1/4"	10	140	150	130
HRR	bola de acero de 1/2"	10	50	60	130
HRS	bola de acero de 1/2"	10	90	100	130
HRV	bola de acero de 1/2"	10	140	150	130

Para realizar el ensayo se debe tener las siguientes consideraciones:

1. La superficie de la probeta debe ser plana, estar limpia, homogénea y perpendicular a la bola, libre de óxido y lubricantes.
2. El espesor de la probeta debe ser 10 veces la penetración del cono ó de la bola.
3. La distancia entre 2 huellas debe ser mayor a 3 d y la distancia del centro de la huella al borde debe ser al menos 2,5 d.
4. Temperatura de ensayo es alrededor de 23° C
5. Si las piezas son cilíndricas y el diámetro es menor a 30 mm. debemos introducir un factor de corrección.

Este ensayo tiene muchas ventajas como que es un método rápido y preciso, y no necesita de operarios especializados, además deja huellas más pequeñas que el método Brinell. Pero tiene el inconveniente que si el material no asienta perfectamente, las medidas resultan erróneas.

1.3.2.3. Dureza Vickers (HV)

El ensayo de dureza Vickers consiste en presionar el material de prueba con una punta de diamante, con forma de una pirámide de base cuadrada y un ángulo de 136° grados entre las caras opuestas, con una carga de 1 a 100 [kgf]. La carga completa se coloca normalmente de 10 a 15 seg.

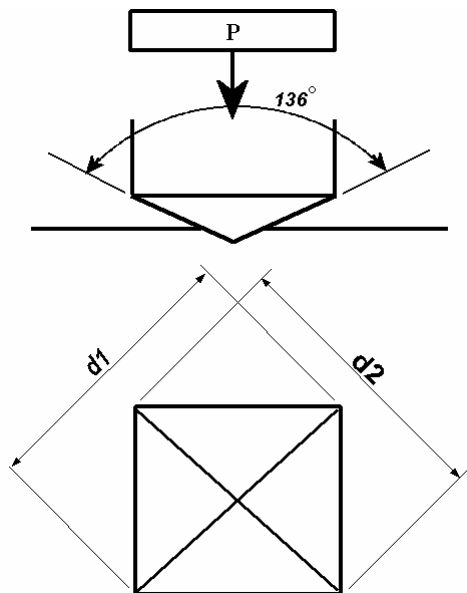


Figura 1.6: Esquema del ensayo de dureza Vickers

Las dos diagonales de la marca que quedó en la superficie del material después que se retiro la carga, se miden usando un microscopio. Con esto se puede calcular el área inclinada de la marca. La dureza Vickers es el cuociente de la carga por el área inclinada de la marca, expresado en la siguiente ecuación:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2}$$

Las ventajas del ensayo de dureza Vickers son que las lecturas tomadas pueden ser extremadamente exactas, y solo se ocupa un solo tipo de punta para todos los tipos de metales y de tratamientos de superficie. Aunque es adaptable y muy exacto desde el más blando al más duro de los materiales, bajo cargas que varían, el durómetro de Vickers es notablemente más cotoso que los durómetros usados en los ensayos Brinell y Rockwell.

Al entregar un resultado de cifras Vickers se debe especificar la carga usada, pero como comúnmente se utilizan 10 kgf, al usar esta no es usual que se especifique.

1.3.3. Tabla de Conversión de Durezas

Tabla 1.3: Tabla de conversión de durezas más comunes en aceros.

VICKERS HV /10	ROCKWELL				BRINELL HBS 3000kg
	A	B	C	D	
865	85		66	75	
832	84		65	75	739
800	84		64	74	722
772	83		63	73	705
746	83		62	72	688
720	82		61	72	670
697	81		60	71	654
674	81		59	70	634
653	80		58	69	615
633	80		57	69	595
613	79		56	68	577
595	79	120	55	67	560
577	78	120	54	66	543
560	78	119	53	65	523
544	77	119	52	65	512
528	77	118	51	64	496
513	76	117	50	63	481
498	75	117	49	62	469
484	75	116	48	61	455
471	74	116	47	61	443
458	74	115	46	60	432
446	73	115	45	59	421
434	73	114	44	59	409

VICKERS HV /10	ROCKWELL				BRINELL HBS 3000kg
	A	B	C	D	
423	72	113	43	58	400
412	72	113	42	57	390
402	71	112	41	56	381
392	71	112	40	55	371
382	70	111	39	55	362
372	70	110	38	54	353
363	69	110	37	53	344
354	69	109	36	52	336
345	68	109	35	52	327
336	68	108	34	51	319
327	67	108	33	50	311
318	67	107	32	49	301
310	66	106	31	48	294
302	66	105	30	48	286
294	65	104	29	47	279
286	65	104	28	46	271
279	64	103	27	45	264
272	64	103	26	45	258
266	63	102	25	44	253
260	63	101	24	43	247
254	62	100	23	42	240
248	62	99	22	42	234
243	61	98	21	41	228

VICKERS HV /10	ROCKWELL				BRINELL HBS 3000kg
	A	B	C	D	
238	61	97	20	40	222
234	60	97	19		218
230	59	96	18		214
226	59	96	17		210
222	58	95	16		208
217	58	95	15		205
213	58	94	14		203
208	57	93	13		200
204	57	92	12		195
200	56	92	11		193
196	56	91	10		190
192	56	90	9		185
188	55	89	8		180
184	54	88	7		176
180	54	87	6		172
176	53	86	5		169
172	53	85	4		165
168	52	84	3		162
164	51	83	2		159
160	51	82	1		156
156	50	81	0		153
152	50	80			150

1.4. Tratamientos Térmicos

Los tratamientos térmicos se efectúan para mejorar las características de un determinado material y obtener así el máximo rendimiento. Son operaciones de calentamiento y enfriamiento a temperaturas y en condiciones determinadas a las que se someten los aceros para conseguir las propiedades y características más adecuadas a su empleo o transformación. No modifican la composición química pero sí otros factores tales como los constituyentes estructurales y como consecuencia las propiedades mecánicas.

1.4.1. Recocido

El objetivo que se intenta alcanzar es ablandar el material para poder trabajarlo mejor. También es utilizado para regenerar el grano o eliminar las tensiones internas. Se debe tener en cuenta que los recocidos no proporcionan generalmente las características más adecuadas para la utilización del acero y casi siempre el material sufre un tratamiento posterior con vistas a obtener las características óptimas del mismo. Cuando esto sucede el recocido se llama también "tratamiento térmico preliminar" y al tratamiento final como "tratamiento térmico de calidad".

Principalmente el recocido es el proceso de calentar una probeta a una temperatura elevada, donde se tendrá solo acero austenítico, y enfriarlo con una velocidad muy lenta generalmente en un horno.

Hay diversas clases de recocidos que se diferencian en la temperatura máxima a que debe calentarse el acero y en las condiciones y velocidades de enfriamiento.

- Recocidos de regeneración (Austenización completa)
- Recocidos globular de Austenización completa.
- Recocidos globular subcrítico.
- Recocidos de ablandamiento subcrítico. (recocido de ablandamiento).
- Recocidos contra acritud.
- Recocidos de estabilización.
- Recocidos Isotérmico.

1.4.2. Templado

Este tratamiento térmico tiene como finalidad aumentar la dureza, la resistencia mecánica y el límite elástico. Por lo tanto disminuyen la estricción y el alargamiento, y generalmente desaparece el periodo plástico. Consiste en un calentamiento a temperatura elevada para transformar toda la masa en austenita, seguido de un enfriamiento rápido para transformar la austenita en martensita.

El factor que caracteriza a la fase de enfriamiento es la velocidad del mismo que debe ser siempre superior a la crítica para obtener martensita.

La velocidad crítica de los aceros al carbono es muy elevada. Los elementos de aleación disminuyen en general la velocidad crítica de templado y en algunos tipos de alta aleación es posible realizar el templado al aire. A estos aceros se les denomina "autotemplantes".

Los factores que influyen en la práctica del templado son:

- El tamaño de la pieza: cuanto más espesor tenga la pieza más hay que aumentar el ciclo de duración del proceso de calentamiento y de enfriamiento.
- La composición química del acero: en general los elementos de aleación facilitan el templado.
- El tamaño del grano: influye principalmente en la velocidad crítica del templado, tiene mayor templabilidad el de grano grueso.
- El medio de enfriamiento: el más adecuado para templar un acero es aquel que consiga una velocidad de templado ligeramente superior a la crítica. Los medios más utilizados son: aire, aceite, agua, baño de Plomo, baño de Mercurio, baño de sales fundidas y polímeros hidrosolubles.

Existen varios tipos de templado, que dependen básicamente de la velocidad de enfriamiento:

- Templados Normales
 - Austenización Completa
 - Austenización Incompleta.
- Templados Interrumpidos:
 - Agua y Aire
 - Aceite y Aire

Agua y Aceite

- Templados Isotérmicos:

Austempering

Martempering

Maqueching

Sub-Cero

- Templados Superficiales:

Oxicetato

Inducción

Plasma

Fricción

1.4.3. Normalizado

Consistente en calentar el acero a una temperatura entre 50 a 80°C superior a la temperatura de la transformación austenítica, para que se transforme todo a esta fase. Una vez pasado todo el material al estado austenítico, se deja enfriar al aire. La velocidad de enfriamiento es más lenta que en el templado y más rápida que en recocido. El objetivo del normalizado es volver el acero al estado que se supone normal después del tratamientos defectuosos, se consigue así afinar y homogenizar su estructura, y eliminar tensiones internas. Se emplea generalmente para aceros al carbono de baja aleación.

1.4.4. Revenido

Este tratamiento térmico es efectuado después del templado con el fin de obtener modificaciones que le confieran las características de empleo deseadas. Este tratamiento provoca la formación de una estructura más próxima al estado de equilibrio, que la obtenida mediante el templado. Consiste en un calentamiento a temperaturas inferiores a A_1 , un mantenimiento durante largo tiempo, seguido de un enfriamiento al aire. Mediante este tratamiento se consigue:

- Eliminar las tensiones internas provocadas por el cambio de estructura, transformando la martensita tetragonal en cúbica.
- Disminuir la dureza de temple a los valores adecuados para el uso de la pieza.

- Transformar en perlita ó bainita, la austenita residual. Dentro del amplio intervalo de temperaturas de revenido, a medida que ésta aumenta, la dureza y resistencia a la tracción disminuyen, aumentan la resiliencia, estricción y alargamiento.

1.5. Templabilidad

Es una medida cualitativa de la velocidad con que la dureza disminuye con la disminución de la velocidad de enfriamiento, es decir la capacidad de templarse a distintas velocidades de enfriamiento. Por ejemplo un material que tiene una templabilidad muy alta, al dejarlo enfriar al aire se va templar, es decir gran parte o el total de la austenita va a transformarse en martensita.

Hay diferentes factores que influyen en la templabilidad de un acero como lo elementos aleados, generalmente desplazan la curvas de enfriamiento a la derecha, por ende hay una menor velocidad crítica de temple y por lo tanto se tiene templado a una velocidad más baja. Son elementos tales como Mn, Cr, C, Ni y Mo, con excepción del Co. También el tamaño del grano influye, ya que al aumentar el tamaño del grano las curvas de enfriamiento se desplazan a la derecha y por lo tanto se tiene el mismo efecto anterior.

Para determinar la templabilidad de un acero se realizan principalmente dos tipos de ensayo.

1.5.1. Ensayo de Grossman

El ensayo de templabilidad de Grossman o también conocido como ensayo de templabilidad por las curvas en U, consiste en templar al agua, es decir calentar a una temperatura bastante alta (sobre la de transformación eutectoide) y enfriar sumergiendo en agua las barras cilíndricas de diferentes diámetros, generalmente desde ½” hasta 2”. En seguida se pulirán y se medirá la dureza en función de la distancia al centro usando la medida Rockwell “C” (HRC). Cuando dureza baja a cierto valor crítico en el centro de la muestra, se define como el diámetro crítico para el cual la aleación puede ser templada.

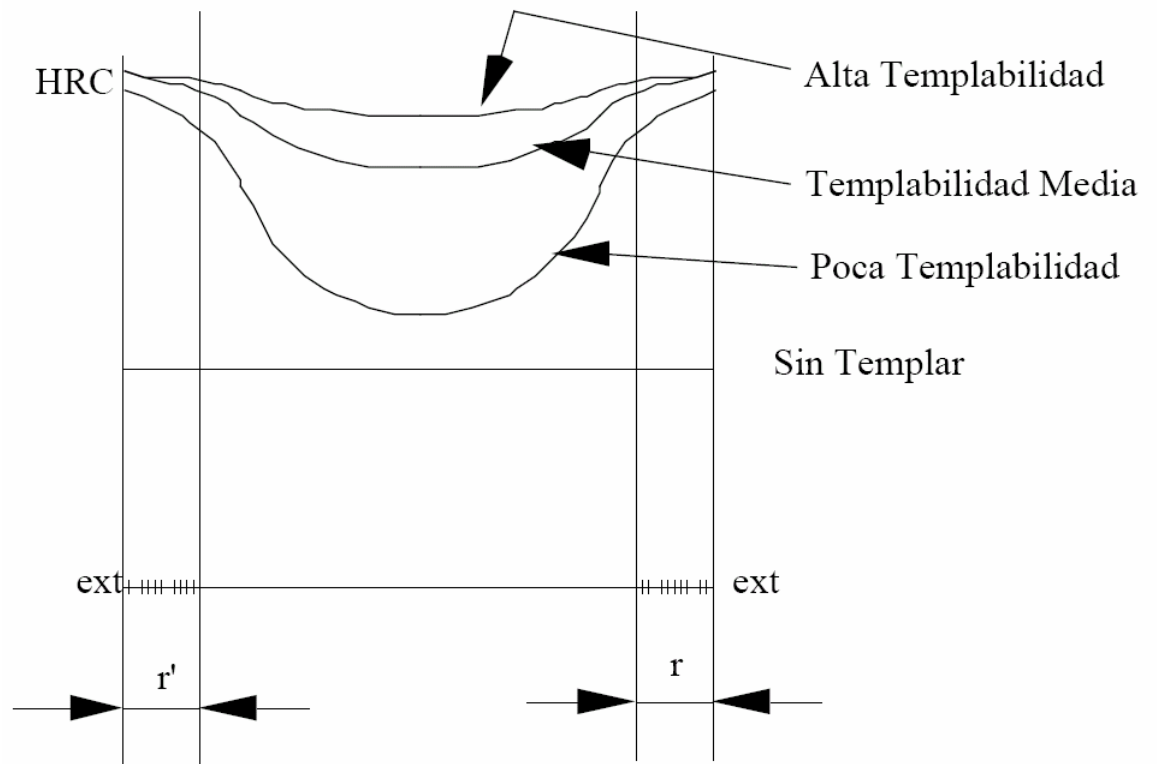


Figura 1.7. Perfiles de dureza del ensayo Grossman

1.5.2. Ensayo de Jominy

Este ensayo consiste en templar una probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro por 100 mm de largo. Se coloca sobre un soporte y se le arroja agua a temperatura ambiente (24°C) en el extremo inferior, con esto se realizará un enfriamiento de abajo a hacia arriba. Después de esto se cortará la probeta en secciones y se medirá la dureza a lo largo de la barra, realizando un grafico de dureza (generalmente Rockwell C) en función del largo de la barra. Estas curvas se denominan curvas de Jominy o de templabilidad. Mientras mas inclinada sea la curva menos templable es el acero.

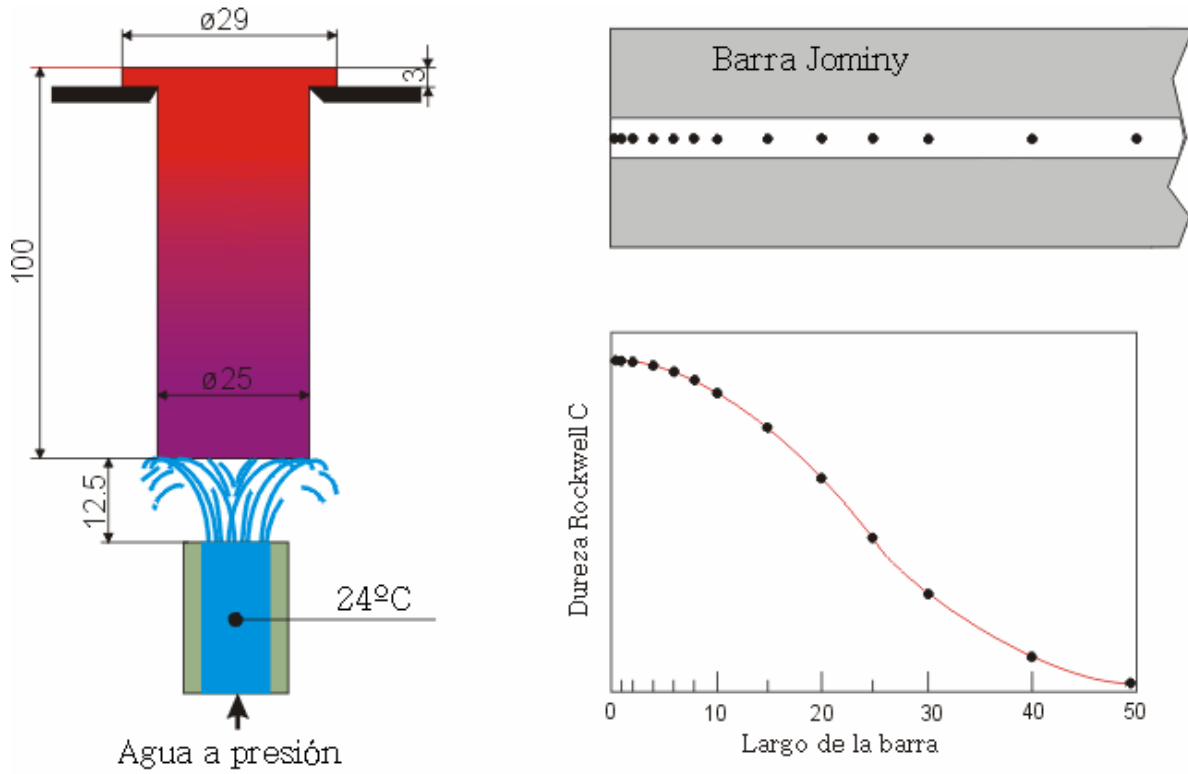


Figura 1.8: Esquema del ensayo Jominy y curva de templabilidad.

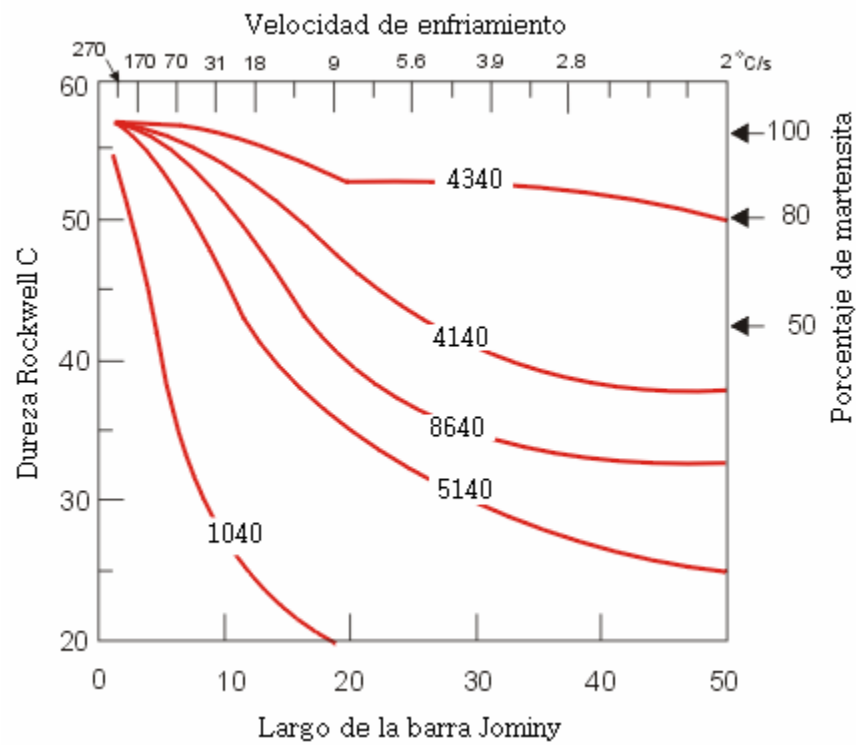


Figura 1.9: Curvas de templabilidad de diferentes aceros con 0,4%p C